Spanningsvermenigvuldigers

Spanningsvermenigvuldigers zijn schakelingen die, met condensatoren en diodes, uit een lage wissel- of gelijkspanning een hogere gelijkspanning afleiden. Lekker experimenteren voor de hobbyist, want u kunt er centimeters lange vonken mee produceren!

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 29-12-2021

Kennismaking met spanningsvermenigvuldigers

Inleiding
U hebt een voedingsspanning van 24 V nodig, maar u hebt alleen een trafootje van 12 V in voorraad. Wat is de oplossing? De in dit artikel besproken eenvoudige schakelingen met diodes en condensatoren zijn uitermate geschikt om uit een lage wisselspanning een hogere gelijkspanning af te leiden.
Er zijn echter ook schakelingen ontwikkeld die uit een lage gelijkspanning een veel hogere gelijkspanning afleiden. Dat kan natuurlijk ook met moderne boost-converters, maar die gebruiken spoelen en in de inleiding van dit artikel werd gesteld dat er uitsluitend diodes en condensatoren worden gebruikt. Deze schakelingen vallen dus af. Bovendien zijn boost-converters absoluut niet in staat dezelfde mate van spanningsvermeerdering te genereren als de in dit artikel beschreven schakelingen. In de loop der geschiedenis zijn diverse schakelingen ontwikkeld, die wij met de naam van hun uitvinders zullen presenteren.

Niet zo zeldzaam als het lijkt
Spanningsvermenigvuldigers lijken misschien zeldzame schakelingen, maar in het tijdperk van de beeldbuis-TV zat er zo'n schakeling in iedere TV. De naversnellingsspanning van meerdere tientallen kV's die ervoor zorgde dat de elektronen met voldoende snelheid op het scherm terecht kwamen werd altijd gegenereerd door een spanningsvermenigvuldiger. Ook in de oude analoge oscilloscopen met een beeldbuis, die nu voor een prikje te koop zijn, is een dergelijke schakeling aanwezig.

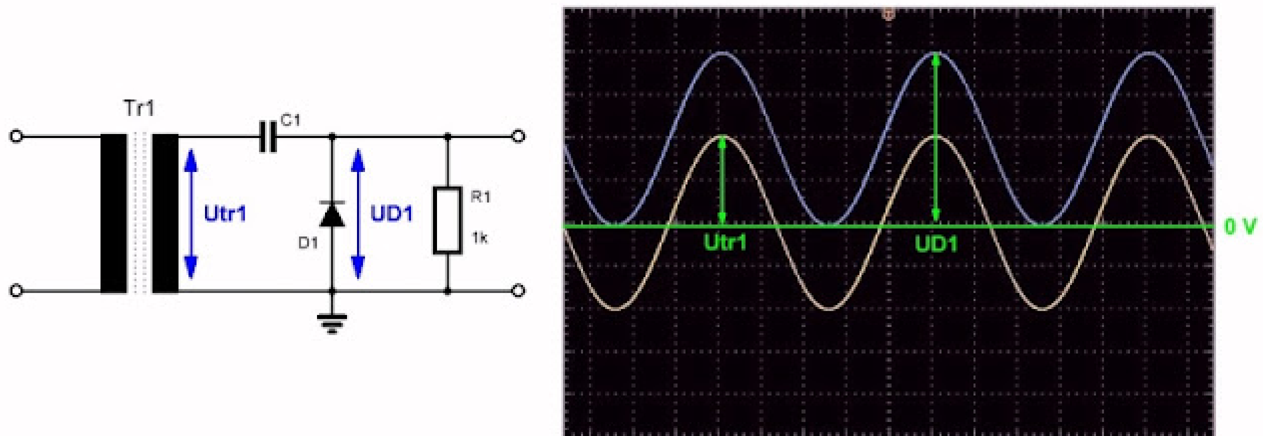
Gevaarlijke experimenteer schakelingen
Met spanningsvermenigvuldigers kunt u spanningen van tientallen tot honderden kV's genereren en vonken van centimeters trekken. Het zijn dus ideale experimenteer schakelingen voor de elektronica hobbyist. Bedenk echter wél dat het dus ook gevaarlijke schakelingen zijn en dat u goed moet nadenken voor u iets aanraakt in uw schakeling.

Welke schakelingen komen aan de orde?
- Spanningsverdubbelaars
    - De schakeling van Villard
    - De schakeling van Greinacher
    - De schakeling van Delon
    - De schakeling van Dickson
    - Het geschakelde condensator systeem
- Spanningsvermenigvuldigers
    - De schakeling van Cockcroft-Walton met halve periode gelijkrichting
    - De schakeling van Cockcroft-Walton met volle periode gelijkrichting

De ladingspomp van Dickson
- De schakeling van Marx

Spanningsverdubbelaars

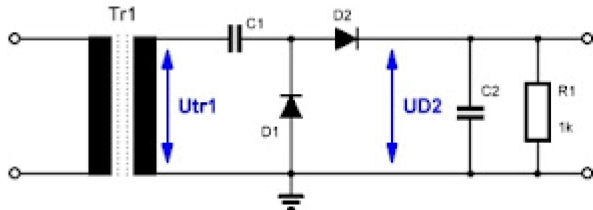
De schakeling van Villard
Deze schakeling zet een wisselspanning met een bepaalde amplitude om in een gelijkspanning met ongeveer de dubbele waarde als topspanning, maar die gelijkspanning is niet afgevlakt. Wij behandelen deze schakeling tóch omdat zij het fundament vormt van de andere spanningsverdubbelaars en -vermenigvuldigers die wél een mooie afgevlakte gelijkspanning leveren. Het eenvoudige schema van deze spanningsverdubbelaar is getekend in de onderstaande figuur.
Zonder de diode D1 zou de condensator C1 de secundaire trafospanning U_{tr1} vrijwel onverzwakt doorkoppelen naar de weerstand R1. Over dit onderdeel zou dus ook een wisselspanning ontstaan. De diode D1 zorgt er echter voor dat de rechter plaat van de condensator niet negatiever kan worden dan ongeveer -0,65 V. Op dat moment gaat de diode immers geleiden en wordt de spanning op dat punt constant gehouden op deze waarde. Het gevolg is dat de trafospanning U_{tr1} achter de condensator als het ware wordt opgetild tot zij vrijwel volledig positief verloopt. De maximale waarde van de spanning U_{D1} over de diode D1 en dus ook over de weerstand R1 is gelijk aan twee maal de amplitude van de wisselspanning min de geleidingsspanning van de diode.
Besluit: de schakeling van Villard clampt een wisselspanning aan de massa, waardoor zij vrijwel volledig positief gaat verlopen en een gelijkspanning wordt die gelijkvormig aan de wisselspanning varieert.

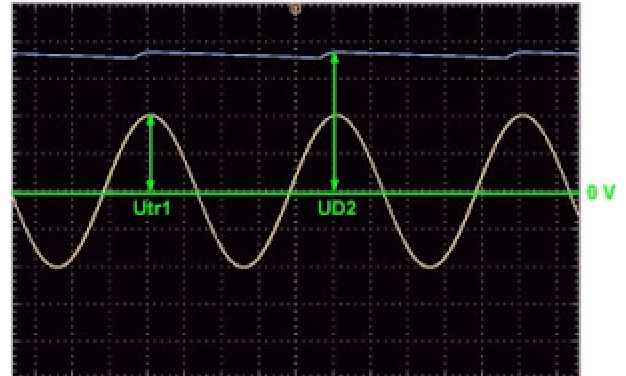


De schakeling van Villard. (© 2021 Jos Verstraten)

De schakeling van Greinacher
Het kost uiteraard niet erg veel verbeelding om te bedenken hoe de uitgangsspanning van de Villard-schakeling kan worden omgezet in een mooie gelijkspanning. Dat vond de Zwitser Heinrich Greinacher (uitvinder van de magnetron-buis) in 1914 ook en dus gaat de onderstaande uiterst eenvoudige schakeling door het leven onder zijn naam. Het volstaat de uitgangsspanning van de Villard-schakeling aan te bieden aan een diode en een condensator om de gelijkvormig aan de wisselspanning variërende gelijkspanning om te zetten in een vrij constante gelijkspanning die bruikbaar is voor het voeden van schakelingen. Dat is dus niets meer of minder dan de bekende halve-periode gelijkrichter.
De Greinacher-schakeling levert een gelijkspanning die gelijk is aan twee keer de amplitude van de trafospanning U_{tr1} minus twee keer de geleidingsspanning van een Si-diode. De diode D1 zorgt er immers voor dat de topwaarde van de spanning U_{D1} ongeveer 0,65 V kleiner is dan de amplitude van de trafospanning. Van die spanning gaat nog eens de geleidingsspanning van D2, ook ongeveer 0,65 V, verloren.
Omdat de amplitude van een wisselspanning gelijk is aan 1,41 keer de effectieve waarde kunt

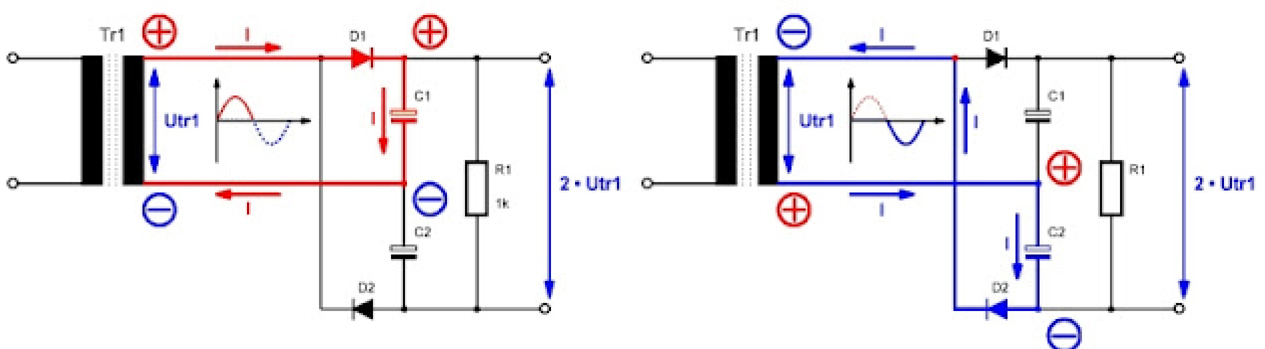
u met de Greinacher-schakeling uit een trafospanning van 12 V_{eff} een gelijkspanning U_{dc} van ongeveer:
$U_{dc} = [2 \cdot (12\ V \cdot 1{,}41)] - (2 \cdot 0{,}65\ V) = 32{,}5\ V$
afleiden.
Dit geldt uiteraard alleen in onbelaste toestand. Bij belasting zakt de spanning in elkaar omdat de impedantie bij 50 Hz van de condensator C1 niet te verwaarlozen is. Deze weerstand staat immers in serie met de belasting en de belastingsstroom veroorzaakt een spanningsval over deze impedantie.





De schakeling van Greinacher. (© 2021 Jos Verstraten)

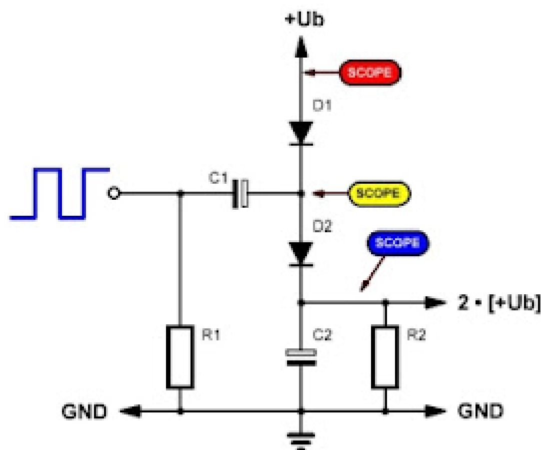
De schakeling van Delon
De Greinacher-schakeling laadt de afvlakelco C2 slechts even op bij de positieve top van de sinusspanning. Dat is niet ideaal omdat de belastingsstroom ervoor zorgt dat deze condensator tussen twee laadcycli flink wordt ontladen. De Delon-schakeling van de onderstaande figuur heeft dit nadeel niet. Hierbij wordt zowel bij de positieve halve periode als bij de negatieve halve periode geladen. In de figuur zijn deze twee laadcycli voorgesteld door de rode en de blauwe laadcircuits. In de ene halve periode (rood) gaat D1 geleiden en wordt C1 opgeladen tot de amplitude van de trafospanning U_{tr1}. In de tweede halve periode (blauw) gaat D2 geleiden en wordt C2 tot dezelfde spanning opgeladen. Duidelijk blijkt dat de twee condensatorspanningen in serie staan en dat dus over de weerstand R1 een gelijkspanning staat die ongeveer gelijk is aan twee keer de amplitude van de trafospanning. Het nadeel van deze schakeling is wél dat de secundaire trafowikkeling nu niet met één kant aan de massa van de schakeling kan liggen. Dat kan soms bezwaarlijk zijn.

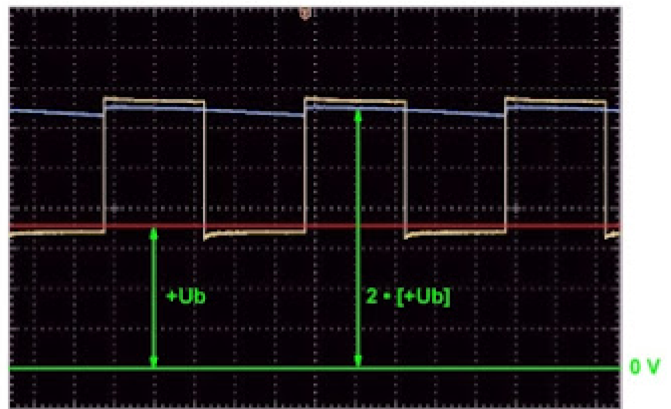


De schakeling van Delon. (© 2021 Jos Verstraten)

De schakeling van Dickson
De drie vorige schakelingen zijn geschikt voor het gebruik achter de secundaire wikkeling van een voedingstrafo. U wilt echter soms ook een voedingsspanning van bijvoorbeeld 12 V_{dc} verdubbelen tot ongeveer 24 V_{dc}. De basisschakeling is erg eenvoudig en getekend in het onderstaande schema. U ziet echter dat u hierbij wél een blokspanning nodig hebt die even groot is als de voedingsspanning die u wilt verdubbelen.
Zonder deze blokspanning wordt de voedingsspanning $+U_b$ (rode trace) via de dioden D1 en D2 doorgekoppeld naar de uitgang. Deze staat dus op een lagere spanning, want over de geleidende diodes valt uiteraard twee keer 0,65 V. Het knooppunt tussen beide diodes (gele

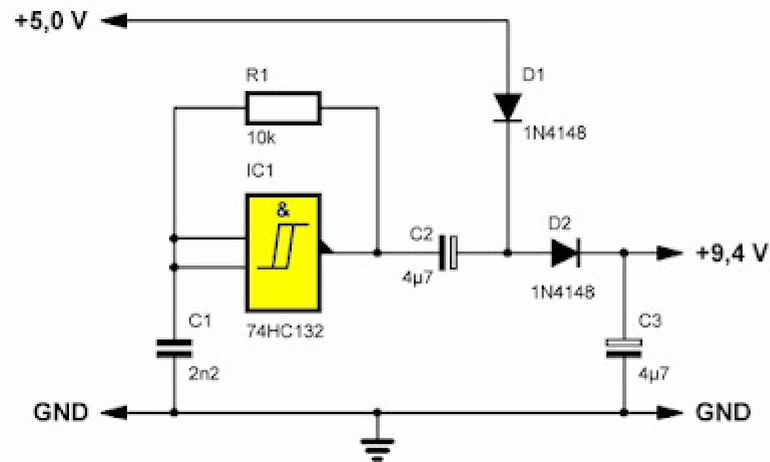
trace) staat op een spanning die 0,65 V lager is dan de voedingsspanning. De condensator C1 wordt tot deze spanning opgeladen.
Stel nu dat de blokgolf wordt aangeboden. Als deze 'L' is verandert er niets aan de beschreven situatie. Anders wordt het als deze naar 'H' springt. De linker plaat van de condensator C1 komt dan op de voedingsspanning te staan. Het is immers de bedoeling dat de blokgolf even groot is als de voedingsspanning. Deze positieve spanningssprong wordt doorgekoppeld door de condensator C1. De rechter plaat, die op ongeveer de voedingsspanning stond, krijgt dus een positieve oppepper en komt op een spanning van ongeveer 2 • [+Ub] te staan. Deze spanningssprong wordt doorgelaten door de diode D2 en belandt dus op de condensator C2. Deze wordt opgeladen tot twee maal de voedingsspanning minus de geleidingsspanning van de twee diodes (blauwe trace). Uiteraard zit er ook een rimpel op de spanning over C2, waarvan de frequentie gelijk is aan deze van de blokgolf.





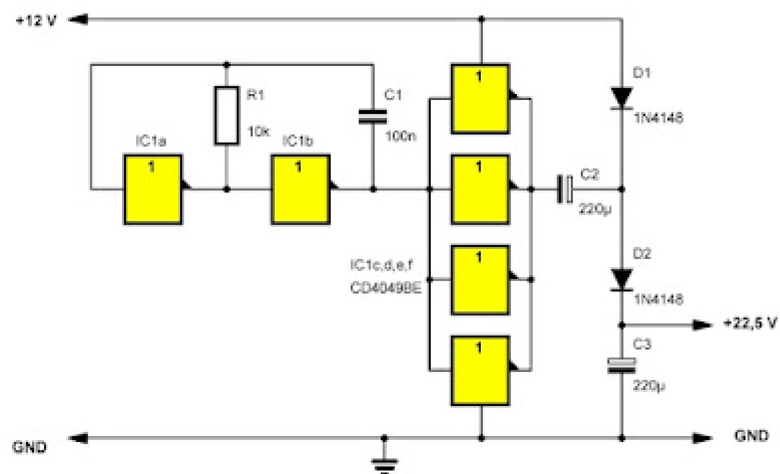
De schakeling van Dickson. (© 2021 Jos Verstraten)

De Dickson-schakeling met een Schmitt-trigger
De eenvoudigste praktische schakeling volgens het idee van Dickson is getekend in de onderstaande figuur. De blokgolf oscillator is samengesteld rond een schmitt-trigger poort, zoals bijvoorbeeld een 74HC132. De terugkoppelweerstand van de uitgang van de poort naar de ingangen zorgt ervoor dat de condensator C1 wordt opgeladen tot de bovenste drempel van de schmitt-trigger en nadien wordt ontladen tot de onderste drempel van de schmitt-trigger. Het verschil tussen beide drempels is de hysteresis van de poort. Het gevolg is dat de uitgang voortdurend omschakelt van 'H' naar 'L' en vice versa. Deze blokgolf wordt gebruikt voor het aansturen van de Dickson-schakeling. Met de ingetekende waarden oscilleert de poort op een frequentie van ongeveer 6 kHz. Bij een voedingsspanning van 5,0 V staat in onbelaste toestand een voedingsspanning van 9,4 V op de uitgang. Deze spanning daalt tot ongeveer 8,0 V bij een belasting met 4 mA. De rimpel bedraagt dan 15 mV. Dergelijke schakelingen zijn dus uitsluitend bruikbaar voor het voeden van schakelingen die een extreem lage voedingsstroom vragen!



Dickson met een schmitt-trigger. (© 2021 Jos Verstraten)

De Dickson-schakeling met een hex-inverter
In een hex-inverter, zoals de CD4049, zitten zes inverters die u kunt toepassen voor het maken van een Dickson-verdubbelaar. Het schema is getekend in de onderstaande figuur. De twee eerste poorten IC1a en IC1b vormen een multivibrator. De blokspanning die op de uitgang verschijnt wordt aangeboden aan de ingangen van de vier overige inverters. Ook de uitgangen van deze poorten worden parallel geschakeld om de stroomcapaciteit te verhogen. Nadien volgt de Dickson-schakeling.



Dickson met een hex inverter. (© 2021 Jos Verstraten)

De Dickson-schakeling met een 555 timer
Uiteraard kunt u ook met een 555 timer een blokgolf oscillator maken die de Dickson-schakeling aanstuurt. Het schema is voorgesteld in de onderstaande figuur. De frequentie van de oscillator wordt bepaald door de weerstanden R1 en R2 en de condensator C1 volgens de formule:
f = 1,44 / [R1 + (2 • R2)] • C1
In dit voorbeeld bedraagt de frequentie ongeveer 2 kHz. De blokspanning staat ter beschikking op pen 3 van de 555 en stuurt de Dickson-schakeling aan die bestaat uit de condensatoren C3 en C4 en de diodes D1 en D2. Bij een voedingsspanning van 5,0 V levert de verdubbelaar ongeveer 8,76 V af bij een belastingsstroom van 40 mA.



Dickson met een 555 timer. (© 2021 Jos Verstraten)

Het geschakelde condensator systeem (1)

De in het onderstaande schema voorgestelde spanningsverdubbelaar is gemakkelijk te integreren en wordt vaak in geïntegreerde schakelingen toegepast. U kunt echter dit systeem gemakkelijk zélf samenstellen met drie elco's en twee elektronische schakelaars zoals de CD4066. De schakeling zet een gelijkspanning van x V om in een gelijkspanning van [2 • x] V. Ook bij dit systeem hebt u een externe klok nodig die de twee schakelaars synchroon omschakelt.

De werking is simpel. Voorwaarde is dat de condensatoren C1 en C2 veel groter zijn dan de condensator C3. Als de drie schakelaars in de links getekende stand staan worden de condensatoren C1 en C2 met de voedingsspanning $+U_b$ verbonden en laden op tot deze spanning. De uitgangscondensator C3 is losgekoppeld van het systeem en voedt de belasting met de lading die nog in het onderdeel aanwezig is van de vorige cyclus.

In de rechter tekening is te zien wat er gebeurt als de schakelaars in de andere stand staan. De condensatoren C1 en C2 staan nu in serie en de spanning van twee maal de voedingsspanning wordt aan de condensator C3 aangeboden. Als deze veel kleiner is dan C1 en C2 zal dit onderdeel opgeladen worden tot een spanning die de waarde van twee maal de voedingsspanning benadert.



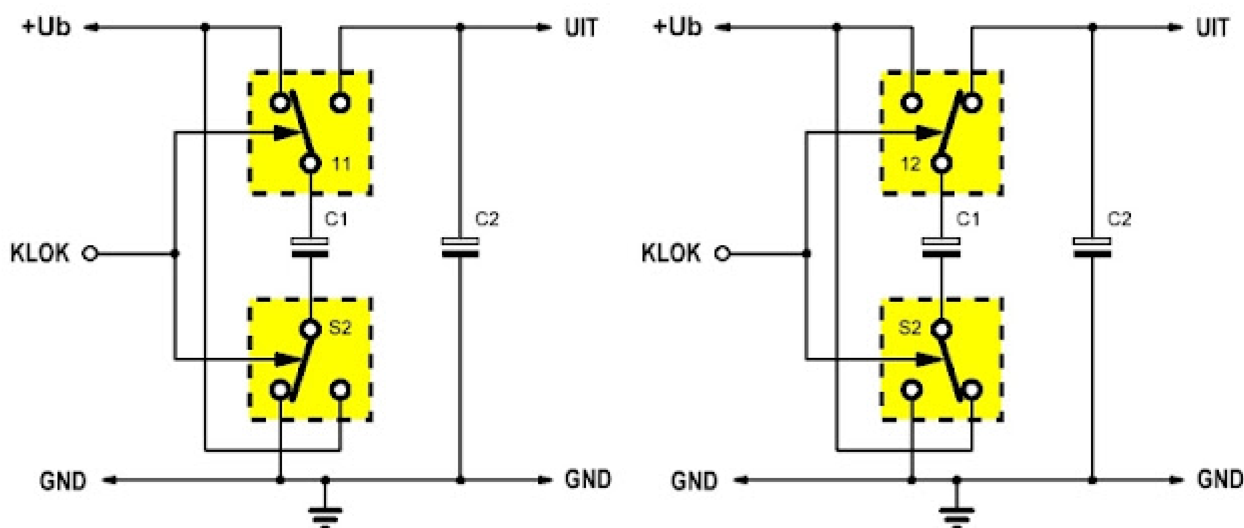
Het eerste geschakelde condensator systeem. (© 2021 Jos Verstraten)

Het geschakelde condensator systeem (2)

Ook dit alternatieve systeem met geschakelde condensatoren zult u vaak aantreffen in geïntegreerde spanningsverdubbelaars omdat het gemakkelijk op een wafer is aan te brengen. Het principe is getekend in de onderstaande figuur. In de linker getekende stand van de elektronische schakelaars wordt de condensator C1 opgeladen tot de voedingsspanning $+U_b$. De condensator C2 is losgekoppeld en de in het onderdeel aanwezige lading van de vorige cyclus voedt de op C2 aangesloten belasting.

Als de klok de twee schakelaars omswitcht komt C1 is serie met de voedingsspanning $+U_b$ te

staan. Deze hoge spanning pompt nu lading in de condensator C2, waardoor de spanning over dit onderdeel tot vrijwel de dubbele waarde van de voedingsspanning gaat stijgen.
Bij het aanschakelen van het systeem zal het meerdere klokcycli duren alvorens de spanning over C2 tot de gewenste waarde is gestegen. Nadien hoeft het systeem uitsluitend het ladingsverlies uit C2, veroorzaakt door de belasting, te compenseren. In intelligente systemen wordt de AAN/UIT-verhouding van de schakelaars gestuurd, waardoor de uitgangsspanning ook wordt gestabiliseerd op een gewenste waarde tussen $+U_b$ en $+[2 \cdot U_b]$.



Het tweede geschakelde condensator systeem. (© 2021 Jos Verstraten)

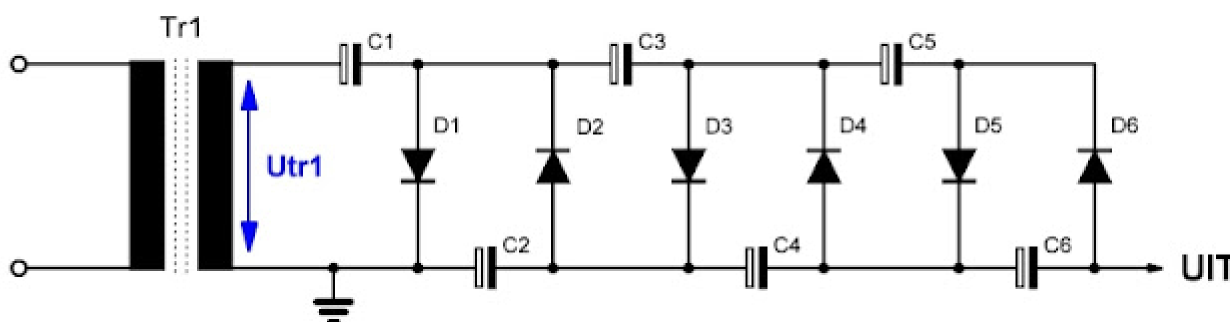
Spanningsvermenigvuldigers

Inleiding

De beschreven spanningsverdubbelaars zijn uiteraard ook spanningsvermenigvuldigers, al is de vermenigvuldigingsfactor maar twee. Maar tóch verkiest men voor deze schakelingen de term '*spanningsverdubbelaars*'. Het zal dan meteen duidelijk zijn dat men met '*spanningsvermenigvuldigers*' schakelingen bedoelt waarbij de vermenigvuldigingsfactor groter is dan twee.

De schakeling van Cockcroft-Walton met halve periode gelijkrichting

Dat is zonder enige twijfel de beroemdste schakeling waarmee u uit een lage wisselspanning een hoge tot zeer hoge gelijkspanning kunt afleiden. Het principe is getekend in de onderstaande figuur. Deze schakeling zat vroeger in iedere beeldbuis-TV, waar een dergelijke cascade van diodes en condensatoren zorgde voor de ongeveer 20.000 V_{dc} hoge naversnellingsspanning die op de binnenkant van het scherm van de beeldbuis stond. Cockroft-Walton cascades worden bijvoorbeeld ook gebruikt in de bekende plasma-bollen, waarmee u met uw vinger vonken kunt trekken in een met edelgas gevulde glazen bol.



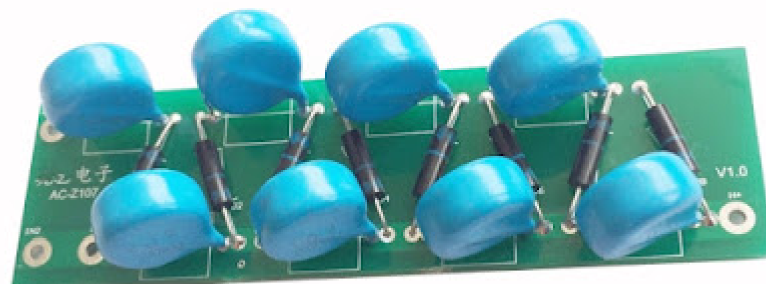
De schakeling van Cockcroft-Walton. (© 2021 Jos Verstraten)

Als u dit schema vergelijkt met de tweede afbeelding uit dit artikel, dan blijkt duidelijk dat de schakeling van Cockcroft-Walton niets meer is dan een logische uitbreiding van de schakeling van Greinacher. Dat betekent dus dat over de even condensatoren een gelijkspanning staat die ongeveer gelijk is aan twee maal de amplitude van de secundaire trafospanning U_{tr1}. Dat loopt aardig op! Als u voor Tr1 een 230 V scheidingstrafo gebruikt, dus met een secundaire spanning van ook 230 V, dan staat er over de even condensatoren een spanning van:
$U_{dc} = 2 \cdot 1{,}41 \cdot 230$ V = 648,6 V
In het getekende voorbeeld zou op de uitgang een gelijkspanning staan van niet minder dan -1,945 kV ten opzichte van de massa! Door het omkeren van alle diodes en condensatoren kunt u uiteraard een positieve uitgangsspanning genereren.

Voor- en nadelen
Het grote voordeel van de Cockcroft-Walton schakeling is dat over alle onderdelen een maximale spanning staat van slechts twee maal de amplitude van de ingangsspanning. U kunt dus gebruik maken van goedkope elco's en normale silicium diodes.
Het grote nadeel is dat de schakeling volgens de halve-periode gelijkrichting werkt. Als de schakeling wordt belast met een uitgangsstroom neemt de spanningsrimpel op de uitgang snel toe naarmate het aantal trappen groter wordt. Dit kunt u weliswaar oplossen met een uitgangsfilter, maar dit vereist afvlakcondensatoren met zeer hoge bedrijfsspanningen en is dus geen praktische oplossing.
Naarmate het aantal trappen toeneemt, beginnen de spanningen over de hogere condensatoren af te nemen als gevolg van de impedantie van de condensatoren in de lagere trappen.

Werken met hoogfrequent wisselspanning
Een aantal van de nadelen kan worden bestreden door de Cockcroft-Walton schakeling niet te voeden met een nettrafo maar met een HF-trafo. De impedantie van de condensatoren neemt dan aanzienlijk af en bovendien wordt de rimpel veel minder storend en gemakkelijker te verwijderen. Bij het gebruik met 50 Hz netspanning moet u absoluut elco´s gebruiken en deze zijn duur en groot als de werkspanning honderden volt moet bedragen. Bij het gebruik met HF-trafo's kunnen de condensatoren veel lager van waarde zijn en technologisch is het veel gemakkelijker om dergelijke condensatoren te maken die een werkspanning van meerdere kV' s hebben.

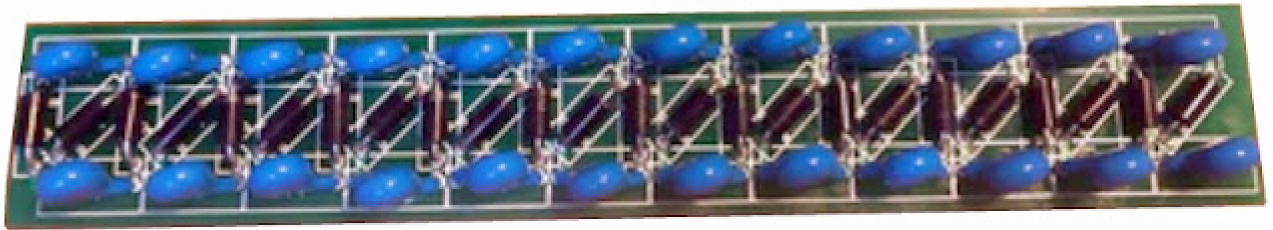
Cockcroft-Walton als module en bouwpakket
De eenvoud van de schakeling en het feit dat spelen met schakelingen die vonken kunnen maken erg populair is heeft tot gevolg dat de Chinese elektronica leveranciers zich op deze schakeling hebben gestort. U kunt voor een habbekrats printjes en bouwpakketten kopen waarmee u een HF Cockcroft-Walton cascade kunt maken die tientallen kV spanning genereren.
In het onderstaand voorbeeld ziet u een dergelijke print die op AliExpress wordt aangeboden voor € 18,20. Deze schakeling van *Qinda Electronics*, met als code AC-Z107, heeft tien condensatoren en diodes die bestand zijn tegen werkspanningen van 10 kV. U schijnt hiermee gemakkelijk spanningen tot 60 kV te kunnen genereren!



De tientraps Cockcroft-Walton cascade AC-Z107. (© Alibaba)

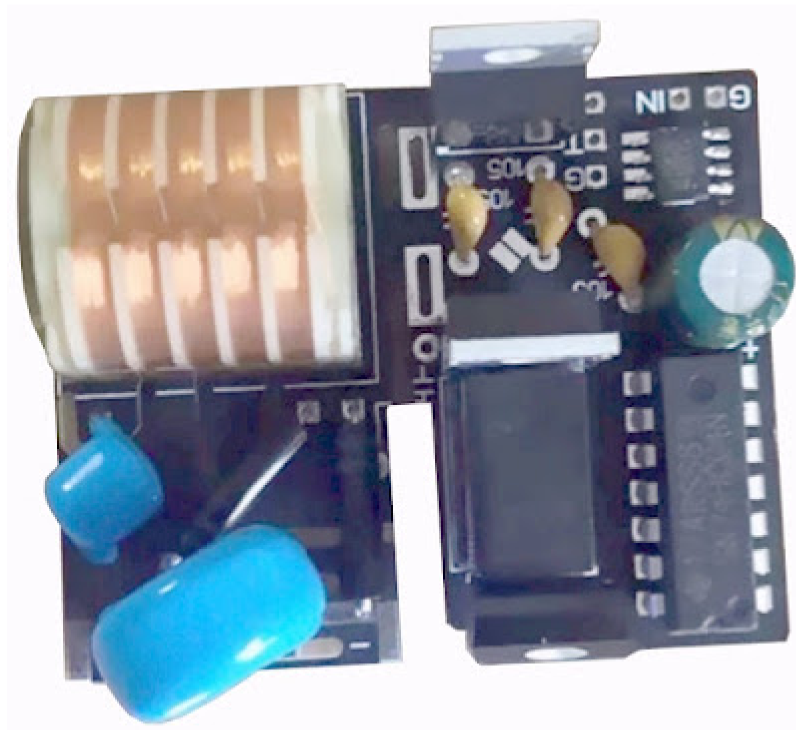
Een tweede vrij goedkope Cockcroft-Walton cascade wordt voorgesteld in de onderstaande

figuur. Deze kost € 14,87 bij de *Thanks-YouBuy Store* (via AliExpress) en bevat 24 trappen. Deze module moet u voeden met een wisselspanning van minimaal 10 kHz en aanbevolen 50 kHz. De schakeling bevat condensatoren met een werkspanning van 6 kV en een waarde van 1.000 pF. Ook hiermee zijn uitgangsspanningen tot 60 kV mogelijk bij een ingangsspanning van 2,5 kV.



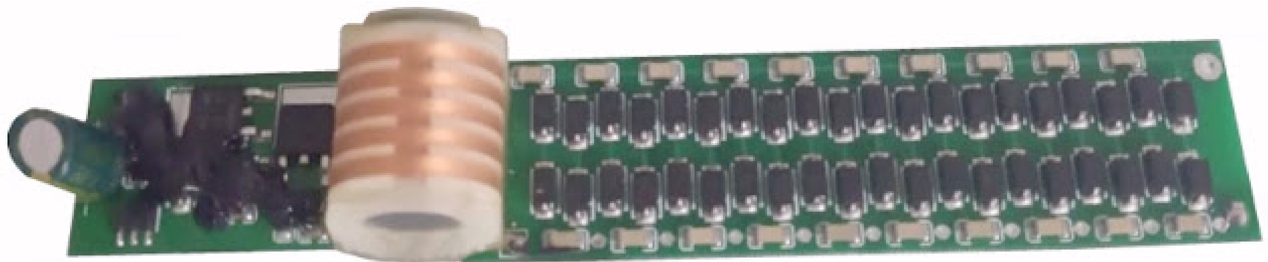
Een 24 traps Cockcroft-Walton cascade. (© AliExpress)

De ingangsschakeling
Natuurlijk moet u een schakeling hebben de noodzakelijke hoogfrequent wisselspanning van meerdere kV's genereert. U kunt zélf gaan experimenteren met een oscillatortje met eindtrap dat een hoogspanningstrafo uit een oude TV voedt. Maar uiteraard zijn ook hiervoor kant-en-klare printen te koop. In de onderstaande afbeelding ziet u een printje dat wordt gevoed uit een spanning van 5 V tot 15 V en op de uitgang twintig keer per seconde een wisselspanningspuls van 5 kV tot 20 kV genereert. Dit schakelingetje kost slechts € 9,60 bij de *Thanks-YouBuy Store* (via AliExpress).



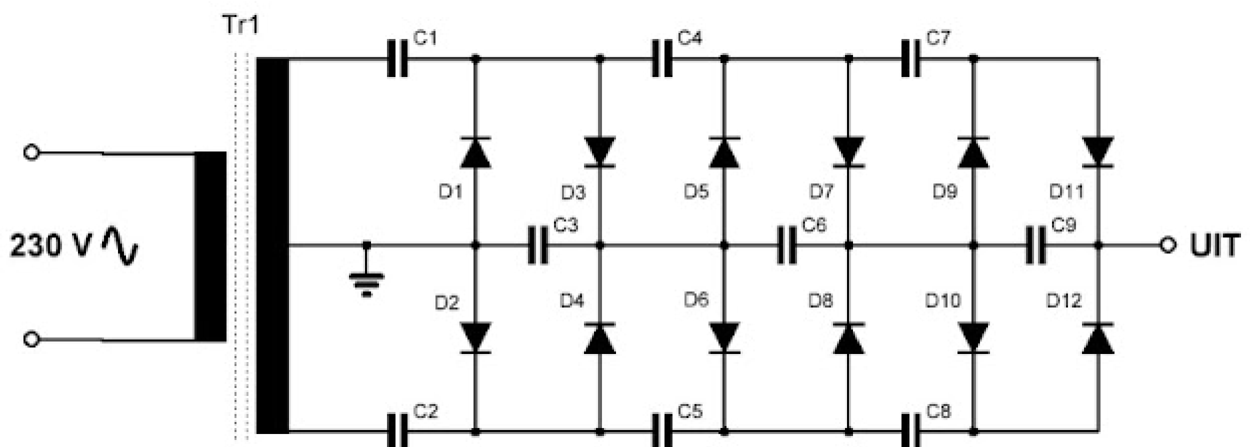
Een 20 kV generator voor het voeden van een Cockcroft-Walton cascade. (© AliExpress)

Er wordt ook een printencombinatie aangeboden voor € 16,11 via AliExpress door de *Part Pro Store*, zie de onderstaande figuur, die u moet voeden uit een gelijkspanning van 5,0 V en die een gelijkspanning van 20 kV op de uitgang levert. Deze combinatie is in staat continu te werken zonder dat er sprake is van hitteschade en verbruikt zonder belasting slechts 1 W.



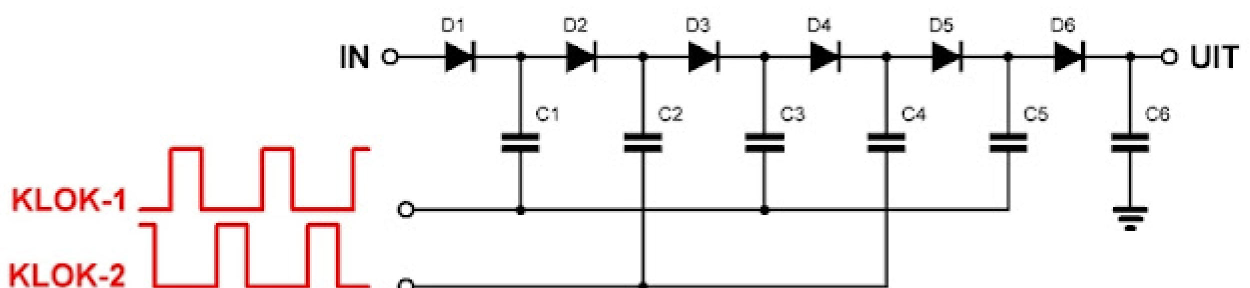
Een complete 5 V_{dc} naar 20 kV_{dc} combinatie. (© AliExpress)

De schakeling van Cockcroft-Walton met volle periode gelijkrichting
De beschreven schakeling heeft als nadeel dat zij werkt met halve periode gelijkrichting en dus last heeft van een grote rimpel op de uitgangsspanning. Men heeft een alternatieve Cockcroft-Walton-schakeling ontwikkeld die gebruik maakt van volle periode gelijkrichting. Het schema is getekend in de onderstaande figuur en is in wezen niets anders dan twee standaard schakelingen die met elkaar zijn gecombineerd.



Cockcroft-Walton met volle periode gelijkrichting. (© 2021 Jos Verstraten)

De ladingspomp van Dickson
Deze schakeling werkt als DC/DC-omzetter en wordt gestuurd uit twee specifiek gevormde klokpulsen, zie de onderstaande figuur. Deze kloksignalen zijn in hun 'H' modus even groot als de ingangsspanning. Stel dat de schakeling wordt ingeschakeld. Als KLOK-1 'L' is wordt de condensator C1 via de diode D1 opgeladen tot de ingangsspanning. Als deze klok 'H' wordt, zal de spanning over C1 in serie komen te staan met dit hoge niveau. De bovenste plaat van deze condensator staat dus op een spanning van [2 • U_{IN}]. Het gevolg is dat D1 is sper wordt gestuurd. De diode D2 gaat geleiden en laadt de condensator C2 tot [2 • U_{IN}]. Als KLOK-2 'H' wordt staat de spanning over C2 in serie met het hoge niveau op deze kloklijn. De bovenste plaat van de condensator C2 gaat dus naar een spanning van [3 • U_{IN}]. Op deze manier zal de spanning van de ingang per trap met eenzelfde spanningswaarde worden verhoogd. Bij de laatste trap staat de condensator C6 naar de massa geschakeld en vlakt de gegenereerde spanning wat af.



De ladingspomp van Dickson. (© 2021 Jos Verstraten)

Het zal duidelijk zijn dat in de praktijk de beschreven ideale situatie niet wordt gehaald. De geleidingsspanning van alle diodes moet uiteraard van de uiteindelijke spanning worden afgetrokken. Vandaar dat men vaak Schottky-diodes toepast omdat deze een veel kleinere geleidingsspanning hebben dan Si-diodes.
Een tweede probleem is dat de spanning over de condensatoren toeneemt naarmate u verder naar rechts in de keten gaat. Vandaar dat de ladingspomp van Dickson niet geschikt is voor het genereren van spanningen van meerdere kilovolts. Het is echter een ideale systeem om de spanning van een 1,5 V celletje op te peppen tot een voedingsspanning van 12 V. Omdat zowel diodes als kleine condensatoren tegenwoordig zonder problemen te integreren zijn wordt de ladingspomp van Dickson vaak in het interne van IC's toegepast voor het verhogen van de voedingsspanning. Het zal geen verbazing wekken dat een volgende stap is het vervangen van de diodes door MOSFET's die worden geschakeld als diodes.

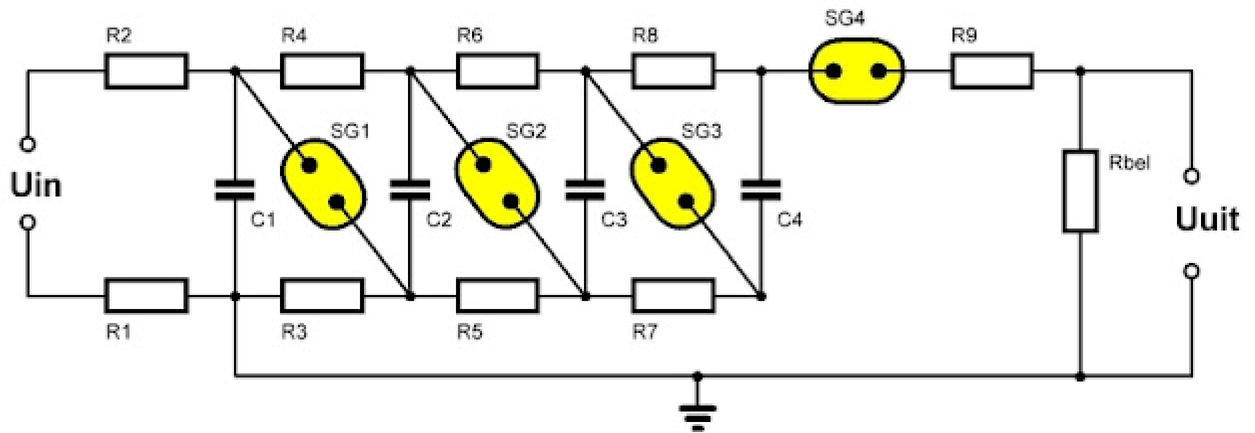
De schakeling van Marx

Een vreemde eend in de bijt

Deze schakeling is, althans in dit artikel, een vreemde eend in de bijt. Er wordt namelijk geen gebruik gemaakt van diodes en condensatoren, maar van vonkenbruggen en condensatoren. De schakeling werd voor het eerst beschreven in 1924 door Erwin Marx en gaat onder zijn naam door het leven. De schakeling wekt een zeer hoge pulsspanning op uit een veel lagere gelijkspanning. Die '*veel lagere*' gelijkspanning moet echter al wel zo groot zijn dat zij in staat is een vonk te veroorzaken over een vonkenbrug (spark gap). Het is dus duidelijk dat u een Marx-generator moet voeden uit een Cockcroft-Walton-schakeling.

Het principe van de Marx-generator

Het principe van de schakeling, voorgesteld in de onderstaande figuur, is zowel uiterst voor de hand liggend als uiterst geniaal. Het idee is dat identieke hoogspanningscondensatoren eerst parallel worden geschakeld over de ingangsspanning en allemaal via serieweerstanden tot deze spanning opladen. In de onderstaande figuur is dit idee uitgewerkt voor een Marx-generator met vier trappen. Op een bepaald moment wordt de spanning over de eerste condensator C1 zo groot dat de over deze condensator aangebrachte vonkenbrug SG1 doorslaat en een vonk produceert. Die vonk ioniseert de atomen tussen de twee contacten van de vonkenbrug waardoor de weerstand tussen deze contacten heel laag wordt. Het gevolg is dat de condensatoren C1 en C2 in serie komen te staan en deze somspanning, gelijk aan twee maal de ingangsspanning, de vonkenbrug SG2 doet doorslaan. Op deze manier zullen alle vonkenbruggen in een fractie van een seconde een na een vonken produceren waardoor alle condensatoren in serie komen te staan. Hoewel op dat moment nog lang niet alle condensatoren zijn opgeladen tot de ingangsspanning zal er tussen de massa en de uitgang een zeer hoge pulsspanning ontstaan. Deze is zo hoog dat u er vonken van tientallen cm mee kunt maken.
De laatste vonkenbrug SG4 isoleert de schakeling van de belasting tijdens het opladen van de condensatoren. Zonder deze vonkenbrug zou de belasting R_{bel} verhinderen dat de condensatoren worden opgeladen. Op het moment dat de vonkenbruggen gaan vonken wordt de spanning over SG4 uiteraard zo groot dat ook deze ook gaat vonken en de spanning over de in serie geschakelde condensatoren aanbiedt aan de belasting. Op de uitgang ontstaat een korte spanningspuls die idealiter gelijk is aan [$n \cdot U_{in}$], waarbij n het aantal trappen van de cascade is. Maar in de praktijk zal de uitgangsspanning aanzienlijk lager zijn omdat, zoals reeds geschreven, niet alle condensatoren tot de maximale waarde worden opgeladen.
Door de ontladingsstroom gaan de spanningen over de condensatoren snel dalen. De spanningen over de vonkenbruggen gaan dus ook dalen met als gevolg dat deze een na een doven. Als ook de laatse vonkenbrug is gedoofd gaat het proces van voren af aan beginnen en gaan de condensatoren weer opladen.



Het basisschema van de schakeling van Marx. (© 2021 Jos Verstraten)

Optimalisering van het Marx-systeem
Er zijn bronnen die beweren dat de spanningsoverdracht van de individuele condensatoren naar de uitgang geoptimaliseerd kan worden als de diverse vonkenbruggen elkaar kunnen zien. Dat zou te maken hebben met het feit dat het ontsteken van een vonkenbrug sneller gaat als de brug wordt bestraald met ultraviolet licht. Dat soort straling zit in het elektromagnetische spectrum dat vrijkomt bij een vonkontlading. Het door de eerste vonkenbrug uitgestraalde UV-licht zou de tweede vonkenbrug sneller laten ontsteken, etc. Volgens dezelfde theorie kunt u een Marx-generator op uw commando laten vonken door de eerste vonkenbrug te bestralen met het licht van een UV-LED. U moet er dan wel voor zorgen dat de ingangsspanning zo klein is dat de vonkenbruggen niet spontaan gaan ontsteken.

Een Marx-generator als bouwset
Door diverse Chinese bedrijven worden goedkope Marx-generatoren aangeboden waarmee u spectaculaire vonken kunt trekken. Het onderstaande bouwpakket wordt bijvoorbeeld geleverd door Banggood voor een prijs van ongeveer vijftig euro. Dit pakket bevat een Marx-schakeling die u moet voeden met een gelijkspanning van 20 kV en die een pulsspanning genereert van ongeveer 200 kV!



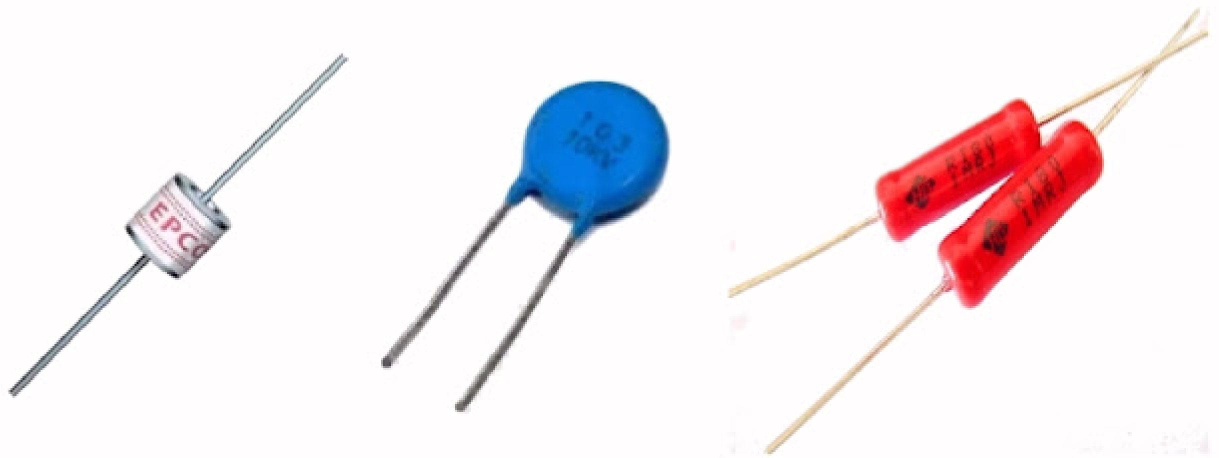
Een bouwpakket van een Marx-generator. (© 2021 Jos Verstraten)

Zelf aan de slag!
Een Marx-generator bestaat uit slechts drie onderdelen: spark gaps, hoogspanningscondensatoren en hoogspanningsweerstanden. Die drie onderdelen kunt u ook tamelijk goedkoop los aanschaffen om zélf te gaan experimenteren met Marx-generatoren. In de onderstaande foto hebben wij deze drie noodzakelijke componenten verenigd. Van links naar rechts: de spark gaps, de hoogspanningscondensatoren en de idem weerstanden.

- **De spark gaps**
  In het genoemde bouwpakket van Banggood worden de vonkenbruggen gemaakt door twee stevige draadjes die een cirkelvormig verbogen einde hebben op een paar millimeter afstand van elkaar te monteren. De bedoeling is dat dan vonkoverslag plaatsvindt in de luchtspleet tussen deze '*bolvormige elektroden*'. Omdat de goede werking van een Marx-generator echter in hoge mate afhankelijk is van het zo snel mogelijk achter elkaar ontsteken van alle vonkenbruggen is het maar helemaal de vraag of zo'n systeem goed werkt. Échte vonkenbruggen (zoek op spark gaps) bestaan uit een gasgevuld glazen buisje waarin twee elektroden op een nauwkeurige afstand van elkaar ingegoten zijn. In principe is dus een neon-buisje een spark gap, maar helaas in de ontsteekspanning van zo'n buisje te laag om bruikbaar te zijn in Marx-generatoren. Via AliExpress worden echter door de *Amy Electronic Store* vijftig stuks spark gaps van het type SSG5X-1 aangeboden voor een prijs van slechts € 83,83 plus € 12,19 verzendingskosten. Deze vonkenbrug van EPCOS heeft een doorslagspanning van 5.000 V en een isolatieweerstand van meer dan 100 MΩ. Het onderdeel wordt gegarandeerd voor 100.000 ontstekingen en heeft een herhalingsfrequentie van maximaal 100 Hz.
- **De hoogspanningscondensatoren**
  Vervolgens de condensatoren. Als u met vonkenbruggen van 5 kV werkt moeten de

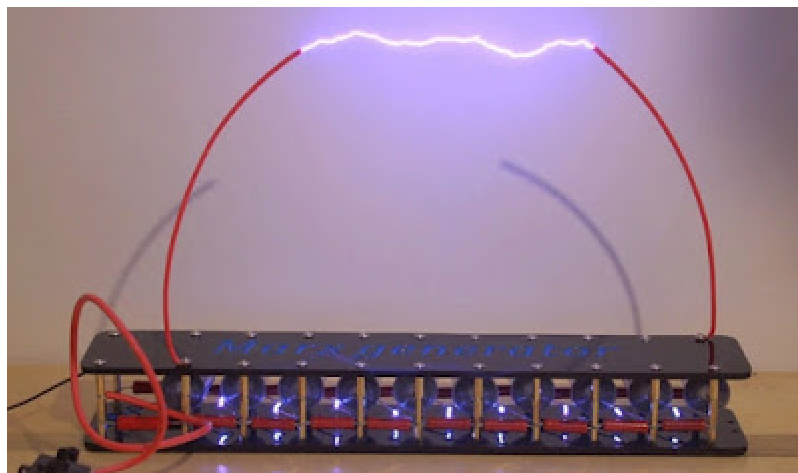
condensatoren een doorslagspanning van minstens de dubbele waarde hebben. Wij hebben op AliExpress de leverancier *Super Mail of Electronics Components* gevonden die ceramische condensatoren van 10 nF en 10 kV aanbiedt voor een prijs van € 5,16 voor vijf stuks.

- **De hoogspanningsweerstanden**
  Alweer op AliExpress van de leverancier *Sincere Girl Store*. Twintig weerstanden van 1 MΩ, 2 W en 10 kV voor € 15,41.



De drie noodzakelijke onderdelen voor het experimenteren met Marx-generatoren. (© 2021 Jos Verstraten)

Een waarschuwing is voor de tweede keer op zijn plaats
Marx-generatoren worden gebruikt om te experimenteren met spanningen van meerdere honderden kV's en u kunt er spectaculaire vonken mee maken, zie de onderstaande foto. Vergeet echter niet dat de spanningen waarmee dergelijke schakelingen werken potentieel dodelijk zijn en u dus extreem voorzichtig moet zijn als u zich op dit experimenteerterrein waagt.



Een voorbeeld van de vonk van een Marx-generator. (© Banggood)